

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2025.04.003

引用格式: 许海鑫, 张子涛, 吴家顺, 等. 徐圩香河湖浮游生物群落特征及水质评价[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2025, 34(4): 19-27.

徐圩香河湖浮游生物群落特征及水质评价

许海鑫, 张子涛, 吴家顺, 朱明, 陈建华

(江苏海洋大学 江苏省海洋生物技术重点实验室, 江苏 连云港 222005)

摘要: 为了解香河湖浮游生物群落结构特征, 掌握水体营养状况并评价鱼产力, 于2023年7月至2024年4月对香河湖的浮游生物资源进行了调查。结果显示, 香河湖共检测到浮游植物7门64种, 其中绿藻门种类最多, 共计24种。浮游植物平均密度为 433.35×10^4 个/L, 平均生物量为42.334 mg/L。浮游动物共检测出4门39种, 其中轮虫22种, 原生动物4种, 枝角类5种, 桡足类8种。浮游动物平均密度为 182.94×10^4 个/L, 平均生物量为0.887 mg/L。对浮游动植物优势种丰度和水环境因子进行冗余分析(RDA)显示, 水温(WT)、溶氧(DO)是影响浮游植物优势种丰度的重要因素, 透明度(SD)是影响浮游动物优势种丰度的重要因素。浮游植物 Margalef 丰富度指数平均为5.240, Shannon-Wiener 多样性指数平均为3.167, Pielou 均匀度指数平均为0.606; 浮游动物 Margalef 丰富度指数平均为4.110, Shannon-Wiener 多样性指数平均为4.325, Pielou 均匀度指数平均为0.807。由浮游生物饵料资源评估鱼产力为 452.68 kg/hm^2 。综合浮游生物群落结构特征和各水质理化因子, 判断香河湖属于中富营养化、轻污染-清洁水体, 符合国标II类水标准。

关键词: 香河湖; 浮游生物; 生物多样性; 鱼产力; RDA 分析

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2025)04-0019-09

Characteristics of the phytoplankton community and water quality assessment in Xuwei Xianghe Lake

XU Haixin, ZHANG Zitao, WU Jiashun, ZHU Ming, CHEN Jianhua

(Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: In order to investigate the community structure characteristics of plankton in Xianghe Lake and evaluate the trophic status and fish productivity of the water body, plankton resources were surveyed from July 2023 to April 2024. The results showed that a total of 64 species of phytoplankton belonging to 7 phyla were identified in Xianghe Lake, with Chlorophyta being the most diverse group, comprising 24 species. The average density of phytoplankton was 433.35×10^4 ind./L, and the average biomass was 42.334 mg/L. A total of 39 species of zooplankton belonging to 4 phyla were detected, including 22 species of Rotifera, 4 species of Protozoa, 5 species of Cladocera, and 8 species of Copepoda. The average density of zooplankton was 182.94×10^4 ind./L, and the average biomass was 0.887 mg/L. Redundancy analysis (RDA) analysis between the abundance of dominant plankton species and water environmental

收稿日期: 2025-06-18; 修订日期: 2025-10-27

基金项目: 连云港市科技成果转化揭榜挂帅专项资金项目(CA202202); 泗洪县科技创新专项(H202303); 江苏海洋大学大学生创新创业训练计划项目(2024年)

作者简介: 许海鑫, 硕士研究生, 研究方向为水环境生态, (E-mail) xuhaixin1612@163.com。

通信作者: 陈建华, 正高级实验师, 博士, 研究方向为水环境生态, (E-mail) chenjianhuazsu@163.com。

factors indicated that water temperature (WT) and dissolved oxygen (DO) were the main factors influencing the abundance of dominant phytoplankton, while Secchi depth (SD) was the key factor affecting the abundance of dominant zooplankton. The average Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index, and Pielou evenness index for phytoplankton were 5.240, 3.167, and 0.606; and for zooplankton, the corresponding averages were 4.110, 4.325, and 0.807. The estimated fish productivity based on plankton biomass was 452.68 kg/hm². Based on the structure of the plankton community, physicochemical factors, and biodiversity indices, it was determined that Xianghe Lake is meso-eutrophic and slightly polluted to clean, meeting the national class II water quality standard.

Key words: Xianghe Lake; plankton; biological diversity; fish productivity; RDA analysis

0 引言

香河湖是连云港市徐圩新区的重要配套设施工程和石化基地供水安全的重要应急保障水源地。近年来,随着经济建设进程的推进以及人类活动加剧,尤其过去两年间徐圩新区周边石化工业的快速发展,香河湖水体的环境状况值得关注。作为徐圩新区的重要应急备用水源地,如何确保其水质持续符合应急供水标准显得尤为重要。

浮游生物是水域生态系统的重要初级生产者和初级消费者,既可涵养水体,又是多数水生生物的优质饵料,在维持水体食物网结构与功能中发挥关键作用^[1-2]。由于种类多、数量大、形体微小、细胞构造简单及繁殖周期短等特点,浮游生物对水体环境变化较为敏感^[3-5]。水温、营养盐及 pH 等水环境因子的变化会引起浮游生物的群落结构发生改变^[6-7]。同样,水体中浮游生物的大幅度变化对水体水质和其他水生生物也会产生不同程度的影响。因此,浮游生物密度及种类组成等常被作为反映水体水质和评估水体生产力的一个重要指标^[8-9]。本研究通过对香河湖浮游生物群落及水体理化因子的调查与冗余分析(RDA),揭示浮游生物分布特征及水质状况,以期对香河湖水体生态健康与可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点及采样频率

本研究设置 5 个采样点(如图 1 所示),分别为 4 个湖沿岸点和 1 个湖心点。采样时间为 2023 年 7 月至 2024 年 4 月,按春(4月)、夏(7月)、秋(11月)、冬(1月)四季采样。

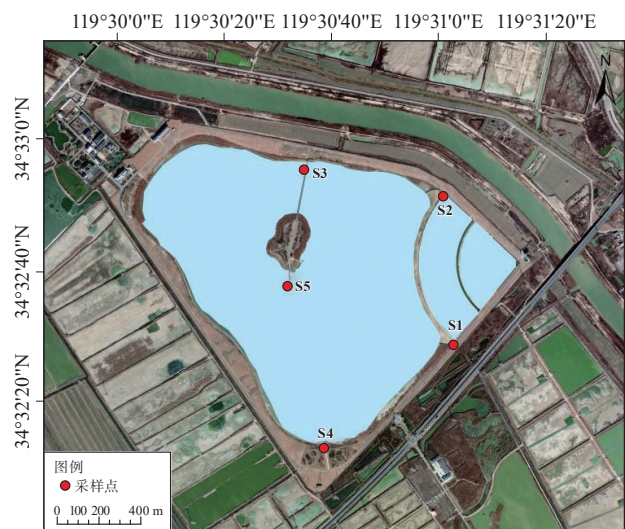


图 1 香河湖采样点位置

Fig. 1 Location of sampling points in Xianghe Lake

1.2 样品采集与处理

利用 YSI 多参数水质分析仪和塞氏盘现场测定样品的水温(WT)、溶解氧(DO)、pH 和透明度(SD);其他 3 种水环境因子总氮(TN)、总磷(TP)和叶绿素 a(Chl-a)由实验室测定,检测方法参照危善玉等^[10]的研究。

参照《河流水生生物调查指南》和《内陆水域渔业资源调查手册》的方法进行水样的采集和固定。使用水生 80 型采水器,在香河湖 5 个部分各设采样点(见图 1)。依据 SC/T 9402—2010《淡水浮游生物调查技术规范》^[11],按水层深度分层采集水样,距水面 0.5 m 处为上层采水点,水体 1/2 水深处为中层采水点,距湖底 0.5 m 处为下层采水点。其中浮游植物的采集使用 2 L 的玻璃取水器在各上层采样点采集 1 L 水样,并加水样体积 1.5% 的鲁哥试液进行固定保存;浮游动物的采集分别在水体上、中、下 3 层共

取水样 20 L, 经 25 号浮游生物网过滤至 100 mL 取样瓶内, 并加入水样体积 4% 的甲醛固定液; 此外, 在水面下 0.5 m 处另取两瓶 500 mL 水样用于其他水质指标的测定。

将固定后的水样带回实验室, 基于形态学方法进行种类鉴定^[12-14], 并在 600 倍显微镜下计数。浮游植物采用面积为 400 mm² 的计数框进行统计, 每瓶水样计数 2 片, 取平均值, 每片计数 100 个视野; 浮游动物水样首先浓缩至 30 mL, 再使用容积为 1 mL 的浮游动物计数框进行全框计数, 计数 2 片, 取平均值。

1.3 水环境因子与浮游生物优势种丰度相关性分析

使用 Canoco 5 软件对水环境因子与浮游动植物优势种丰度进行冗余分析。首先进行去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 并根据分析结果第一轴的数值大小, 选择冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 或典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA)。若第一轴数值大于 4, 则选 CCA; 若介于 3 与 4 之间, 则两种方法均可; 若小于 3, 则选 RDA 的结果优于 CCA 的结果。

1.4 数据处理

浮游生物密度、生物量和生物多样性指数等数据的计算方法参照文献^[15-17]。

浮游植物密度为

$$N = \frac{C_s}{F_s F_n} \times \frac{V}{v} \times P_n$$

式中: N 为浮游植物个数 (个/L); C_s 为计数框面积, 一般为 400 mm²; F_s 为一个视野的面积; F_n 为计数过的视野数; V 为 1 L 水样经沉淀浓缩后的体积 (mL); v 为计数框容积 (mL); P_n 为 F_n 个视野中的浮游植物个体数。

浮游动物密度为

$$N = \frac{V_s n}{V V_a}$$

式中: N 为浮游动物个数 (个/L); V 为采样体积 (L); V_s 为沉淀体积 (mL); V_a 为计数体积 (mL); n 为计数所得个体数。

生物量: 对浮游植物、小型浮游动物的优势种进行实测, 将体积值直接换算为质量值。

优势种通过计算优势度^[18]得出, 即

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$$

式中: Y 为优势度指数; n_i 为第 i 种的数量;

N 为总数量; f_i 为该种出现的频率。优势度指数 $Y > 0.02$ 为优势种, $Y > 0.05$ 为绝对优势种。

Margalef 丰富度指数为

$$d = \frac{S-1}{\ln N}$$

式中: d 为丰富度指数; S 为样品种类数; N 为样品个体总数。

Shannon-Wiener 多样性指数为

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \times \log_2 P_i$$

式中: H' 为种类多样性指数; S 为样品中的种类总数; P_i 为第 i 种的个体数 (n) 与总个体数 (N) 的比值 (n/N)。

Pielou 均匀度指数为

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

式中: J 为均匀度指数; H' 为种类多样性指数; S 为样品中的种类总数。

鱼产力估算公式^[19]为

$$F = B \times (P/B) \times u/K$$

式中: F 为鱼产力 (kg/hm²); B 为单位面积浮游生物生物量; P/B 为浮游生物的系数; u 为饵料利用率 (%); K 为饵料系数, 计算取值参照文献^[20-21]。水体细菌及腐殖质等提供的鱼产力约为浮游生物的 30%~50%^[22]。

2 结果与分析

2.1 浮游植物

2.1.1 香河湖浮游植物种类组成与优势种

共鉴定出浮游植物 7 门 64 种。其中绿藻门有 24 种, 占藻类总数的 37.5%; 蓝藻门 12 种, 占藻类总数的 18.75%; 硅藻门 14 种, 占藻类总数的 21.87%; 隐藻门和甲藻门均为 3 种, 各占 4.69%; 裸藻门和金藻门均为 4 种, 各占 6.25%。总体呈现出典型的温带水域浮游植物群落特征。

香河湖春季浮游植物优势种为棒胶藻、假鱼腥藻、平裂藻、尖针杆藻、小环藻、变异直链藻、骨条藻、啮蚀隐藻; 夏季优势种为螺旋藻、假鱼腥藻; 秋季优势种为螺旋藻、假鱼腥藻、平裂藻、拟菱形弓形藻、弯曲尖头藻、小环藻、栅藻; 冬季优势种为棒胶藻、拟菱形弓形藻、小环藻、栅藻、针形纤维藻、啮蚀隐藻、尖尾蓝隐藻、囊裸藻 (见表 1)。春季优势种群主要是硅藻门; 夏、秋季优势种群均为蓝藻门; 冬季优势种群主要为隐藻门。

表1 香河湖浮游植物优势度
Table 1 Dominant index of phytoplankton in Xianghe Lake

门类	种类名称	春季	夏季	秋季	冬季
蓝藻门 Cyanophyta	棒胶藻 <i>Chlamydomonas</i>	0.193	—	—	0.106
	螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.	—	0.383	0.224	—
	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	0.036	0.151	0.047	—
	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	0.024	—	0.290	—
硅藻门 Bacillariophyta	拟菱形弓形藻 <i>Schroederia nitzschoides</i>	—	—	0.023	0.025
	弯曲尖头藻 <i>Raphidiopsis curvata</i>	—	—	0.154	—
	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	0.038	—	—	—
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.087	—	0.055	0.119
	变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	0.179	—	—	—
	骨条藻 <i>Skeletonema</i> sp.	0.026	—	—	—
绿藻门 Chlorophyta	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.	—	—	0.061	0.035
	针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i>	—	—	—	0.076
隐藻门 Cryptophyta	嗜蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>	0.148	—	—	0.127
	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	—	—	—	0.020
裸藻门 Euglenophyta	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i>	—	—	—	0.085

2.1.2 香河湖浮游植物的密度和生物量

香河湖浮游植物的平均密度为 433.35×10^4 个/L (如表2所示)。其中,绿藻门的平均密度最大,为 222.77×10^4 个/L;甲藻门的平均密度最小,为

0.77×10^4 个/L;秋季蓝藻门的平均密度偏高。香河湖浮游植物的平均生物量为 42.334 mg/L。其中蓝藻门的平均生物量较大,为 31.578 mg/L;裸藻门的平均生物量最小,为 0.035 mg/L。

表2 香河湖浮游植物密度和生物量
Table 2 Density and biomass of phytoplankton in Xianghe Lake

季节	指标	绿藻门	蓝藻门	硅藻门	隐藻门	甲藻门	裸藻门	金藻门	总计
		Chlorophyta	Cyanophyta	Bacillariophyta	Cryptophyta	Pyrrophyta	Euglenophyta	Chrysophyta	
春季	密度/(10^4 个·L ⁻¹)	81.81	31.23	107.35	37.16	0.77	3.61	3.35	265.29
	生物量/(mg·L ⁻¹)	8.161 4	3.706 6	1.157 9	0.834 6	0.077 4	0.059 6	0.285 1	14.282 6
夏季	密度/(10^4 个·L ⁻¹)	514.58	159.74	14.19	9.03	1.55	0.77	—	699.87
	生物量/(mg·L ⁻¹)	18.484 8	27.286 7	0.166 7	0.180 6	0.123 9	0.003 1	—	46.195 9
秋季	密度/(10^4 个·L ⁻¹)	237.94	348.65	44.65	2.32	—	4.13	0.26	637.94
	生物量/(mg·L ⁻¹)	9.104 1	94.802 6	0.233 6	0.041 5	—	0.012 4	0.000 5	104.194 7
冬季	密度/(10^4 个·L ⁻¹)	56.77	14.97	20.13	21.16	0.77	12.13	4.39	130.32
	生物量/(mg·L ⁻¹)	3.556 6	0.516 1	0.116 3	0.339 9	0.056 8	0.064 3	0.013 1	4.663 1
平均	密度/(10^4 个·L ⁻¹)	222.77	138.65	46.58	17.42	0.77	5.16	2.00	433.35
	生物量/(mg·L ⁻¹)	9.826 7	31.578 0	0.406 0	0.349 0	0.065 0	0.035 0	0.075 0	42.334 0

2.2 浮游动物

2.2.1 浮游动物种类组成和优势种

香河湖浮游动物共鉴定出4大类39种。其中轮虫22种,占56.41%;原生生物4种,占10.26%;枝角类5种,占12.82%;桡足类8种,占20.51%。浮游动物种类组成在时间和空间上相对稳定,四季均以轮虫类为主,冬季种类最多,秋季相对较少。

香河湖浮游动物春季优势种为萼花臂尾轮虫、蒲达臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、晶囊轮虫、唇形叶轮虫、长肢多肢轮虫;夏季优势种为萼花臂尾轮虫、梳状疣毛轮虫、蒲达臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、曲腿龟甲轮虫、长肢多肢轮虫;秋季的优势种为曲腿龟甲轮

虫、晶囊轮虫、梨形单趾轮虫、广布中剑水蚤;冬季的优势种为萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、曲腿龟甲轮虫、晶囊轮虫、长额象鼻蚤(见表3)。

2.2.2 香河湖浮游动物的密度和生物量

香河湖浮游动物的平均密度为 182.94×10^4 个/L。其中轮虫的平均密度最大,为 137.35×10^4 个/L;原生动物的平均密度最小,为 $0.562 5 \times 10^4$ 个/L(见表4)。香河湖浮游动物的平均生物量为 0.887 mg/L。其中枝角类的平均生物量最高,为 0.352 mg/L;原生动物的平均生物量最低,为 0.000 4 mg/L。春季浮游动物的总密度最大,冬季的总密度最小。

表3 香河湖浮游动物优势度
Table 3 Dominant index of zooplankton in Xianghe Lake

门类	种类名称	春季	夏季	秋季	冬季
轮虫 Rotifera	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionusca lyciflorus</i>	0.312 1	0.054 4	—	0.034 2
	梳状疣毛轮虫 <i>Synchaeta pectinata</i>	—	0.086 3	—	—
	蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestiensis</i>	0.026 9	0.022 6	—	—
	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	0.021 1	0.207 0	—	0.071 5
	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	—	0.039 0	0.057 8	0.030 2
	晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwel</i>	0.041 3	—	0.315 7	0.157 1
	唇形叶轮虫 <i>Notholon labis</i>	0.236 3	—	—	—
	长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	0.052 5	0.072 3	—	—
	梨形单趾轮虫 <i>Monostyla pyriformis</i>	—	—	0.143 1	—
桡足类 Copepoda	广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>	—	—	0.084 3	—
枝角类 Cladocera	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	—	—	—	0.072 5

表4 香河湖浮游动物密度和生物量
Table 4 Density and biomass of zooplankton in Xianghe Lake

季节	指标	轮虫 Rotifera	原生动物 Protozoa	枝角类 Cladocera	桡足类 Copepoda	总量
春季	密度 / (10 ⁴ 个 · L ⁻¹)	252.00	—	1.13	25.63	278.75
	生物量 / (mg · L ⁻¹)	0.583	—	0.161	0.095	0.839
夏季	密度 / (10 ⁴ 个 · L ⁻¹)	144.25	—	1.00	56.13	201.38
	生物量 / (mg · L ⁻¹)	0.212	—	0.070	0.353	0.636
秋季	密度 / (10 ⁴ 个 · L ⁻¹)	84.50	1.50	2.25	39.25	127.50
	生物量 / (mg · L ⁻¹)	0.257	0.002	0.196	0.152	0.606
冬季	密度 / (10 ⁴ 个 · L ⁻¹)	68.63	0.75	10.38	44.38	124.13
	生物量 / (mg · L ⁻¹)	0.192	0.000 03	0.983	0.294	1.468
平均	密度 / (10 ⁴ 个 · L ⁻¹)	137.35	0.562 5	3.688	41.34	182.94
	生物量 / (mg · L ⁻¹)	0.311	0.000 4	0.352	0.223	0.887

2.3 香河湖浮游生物的物种多样性

香河湖浮游植物的 Shannon-Wiener 多样性指数为 2.025~3.976, 平均值为 3.167; Margalef 丰富度指数为 4.869~5.784, 平均值为 5.240; Pielou 均匀度指数为 0.375~0.758, 平均值为 0.606。冬季浮游植物的多样性指数最高(见表 5)。

表5 香河湖浮游生物多样性指数
Table 5 Biodiversity indices of plankton in Xianghe Lake

季节	多样性指数 H'		丰富度指数 d		均匀度指数 J	
	浮游植物	浮游动物	浮游植物	浮游动物	浮游植物	浮游动物
春季	3.703	3.140	4.869	4.585	0.722	0.554
夏季	2.025	7.711	5.313	3.031	0.375	1.529
秋季	2.964	3.010	4.992	3.802	0.569	0.539
冬季	3.976	3.439	5.784	5.022	0.758	0.606
平均	3.167	4.325	5.240	4.110	0.606	0.807

浮游动物的 Shannon-Wiener 多样性指数为 3.010~7.711, 平均值为 4.325; Margalef 丰富度指数为 3.031~5.022, 平均值为 4.110; Pielou 均匀度指数为 0.539~1.529, 平均值为 0.807。浮游动物

的 Margalef 丰富度指数在冬季最高, 而 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均在夏季最高(见表 5)。综合夏季的多样性指数 H' 和均匀度指数 J 来看, 浮游植物处于全年最低水平, 而浮游动物处于全年最高水平。

2.4 水体鱼产力估算

香河湖水体的平均水深 2.46 m, 现有浮游动、植物生物量分别为 0.887 mg/L 和 42.334 mg/L。计算结果显示, 每 hm² 浮游动、植物生物量分别为 21.82 kg 和 1 041.42 kg, 对应鱼产力分别为 10.91 kg/hm² 和 312.43 kg/hm²。水体细菌及腐殖质等提供的鱼产力按 40% 计算, 即 129.34 kg/hm²。综合估算总鱼产力为 452.68 kg/hm²。

2.5 浮游生物与水环境因子的关系

水体 pH 较稳定, 集中在 8.0~8.5, 呈弱碱性; DO 含量较高, TP 浓度偏高, 超过地表 III 类标准; 秋、冬季节 TN 浓度显著高于春、夏两季。Chl-a 含量处于中营养型水质水平(见表 6)。总体水质较稳定, 但需关注氮、磷升高所带来的潜在富营养化风险。

表6 香河水库不同季节水环境因子
Table 6 Hydro-environmental parameters
of Xianghe Lake in different seasons

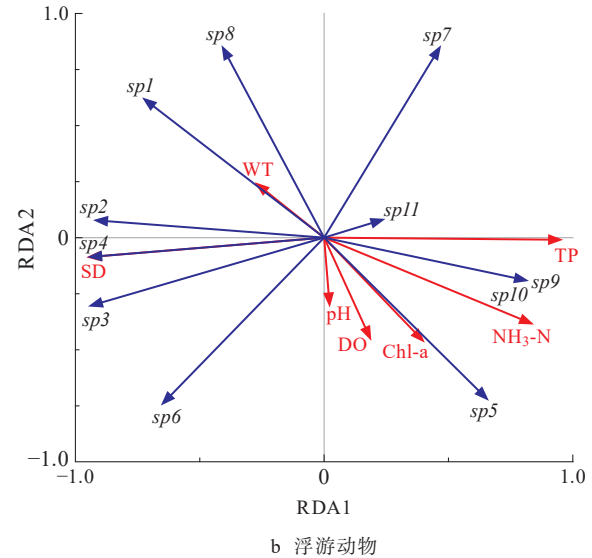
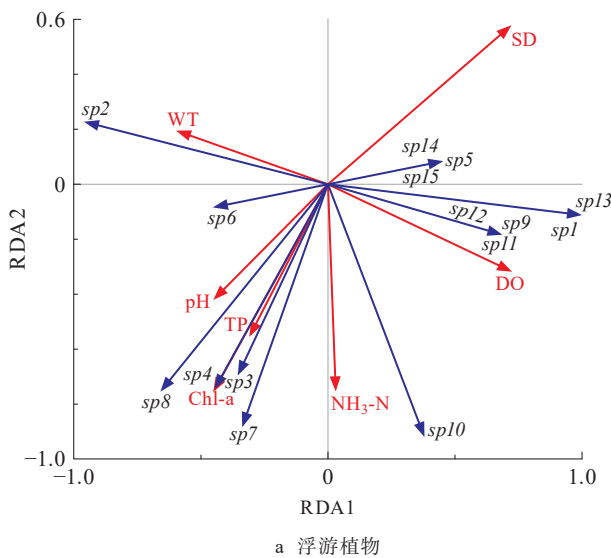
理化因子	春季	夏季	秋季	冬季
水温 / $^{\circ}\text{C}$	16.64	30.10	19.06	4.48
pH	8.39	8.36	8.41	8.26
溶解氧 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	8.23	6.74	7.62	9.70
透明度 /cm	80.2	67.8	43.2	62.8
总磷含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.05	0.06	0.09	0.10
总氮含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.16	0.08	0.31	0.30
叶绿素 a 含量 / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	7.98	5.82	12.06	4.53

根据去趋势对应分析(DCA)结果,选择冗余分析(RDA)进行数据解读,分析香河湖浮游生物和环境因子之间的关系。浮游植物 RDA 排序第一轴和第二轴的特征值分别为 0.537 和 0.244,共解释变量

为 78.1% (见表 7)。WT 与螺旋藻、假鱼腥藻、弯曲尖头藻、栅藻、拟菱形弓形藻、平裂藻呈正相关;小环藻与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈较强正相关,但与 WT 呈较强负相关;尖针杆藻、变异直连藻、骨条藻、棒胶藻、嗜蚀隐藻均与 DO 呈较强正相关,而与 WT 呈较强负相关;针形纤维藻、尖尾蓝隐藻、囊裸藻与 SD 呈较强正相关,而与 pH 呈较强负相关(见图 2)。

表7 浮游植物、浮游动物与环境因子的 RDA 结果
Table 7 RDA analysis results of phytoplankton and zooplankton in relation to environmental factors

RDA	统计量	第一轴	第二轴	第三轴	第四轴
浮游植物	特征值	0.537	0.244	0.219	0
	解释方差	53.70	78.06	100.00	0
浮游动物	特征值	0.555	0.309	0.137	0
	解释方差	55.45	86.33	100.00	0



注: a 图 $sp1$ 为棒胶藻, $sp2$ 为螺旋藻, $sp3$ 为拟菱形弓形藻, $sp4$ 为栅藻, $sp5$ 为针形纤维藻, $sp6$ 为假鱼腥藻, $sp7$ 为平裂藻, $sp8$ 为弯曲尖头藻, $sp9$ 为尖针杆藻, $sp10$ 为小环藻, $sp11$ 为变异直连藻, $sp12$ 为骨条藻, $sp13$ 为嗜蚀隐藻, $sp14$ 为尖尾蓝隐藻, $sp15$ 为囊裸藻; b 图 $sp1$ 为蓼花臂尾轮虫, $sp2$ 为梳状疣毛轮虫, $sp3$ 为蒲达臂尾轮虫, $sp4$ 为角突臂尾轮虫, $sp5$ 为曲腿龟甲轮虫, $sp6$ 为晶囊轮虫, $sp7$ 为唇形叶轮虫, $sp8$ 为长肢多肢轮虫, $sp9$ 为梨形单趾轮虫, $sp10$ 为广布中剑水蚤, $sp11$ 为长额象鼻溞。WT 为水温, SD 为透明度, DO 为溶解氧, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为氨氮, TP 为总磷, Chl-a 为叶绿素 a。图中红色射线代表不同的环境因子,射线间的夹角代表环境因子的正、负相关性(锐角:正相关;钝角:负相关;直角:无相关性);红色箭头连线与排序轴夹角的大小表示环境因子与排序轴相关性的正、负相关性;蓝色箭头连线代表浮游动物、植物的各个优势种样本,若样本方向与环境因子方向相同,表示二者正相关,若方向相反,则表示负相关。

图2 浮游植物和浮游动物优势种丰度与环境因子的 RDA 分析

Fig. 2 RDA analysis of the abundance of dominant phytoplankton and zooplankton species and environmental parameters

3 讨论

3.1 香河湖水体水质评价

香河湖浮游植物共鉴定出 7 门 64 种,其种类和数量在夏秋季较多,而在冬春季较少,呈明显的季节性分布。春季主要以硅藻门为优势类群,夏秋季则以蓝藻门为主。这一分布特征与孙兴等^[23]对青海湖及

王欣然等^[24]对红山水库的研究结果基本一致。然而,王军敏等^[25]报道秦山岛周边海域浮游植物群落优势种类群全年皆以硅藻门为主。这可能与不同水体的地理位置、水体特征和人类活动等因素有关。绿藻门偏好较高温水体,且具有趋光性特征。硅藻密度较大,可能因其适应低温并具较强环境耐受性^[26]。蓝藻门在夏、秋季成为优势种,推测可能的原因有:

① 温度适宜: 夏季水温接近大部分蓝藻的最适生长范围(20~30 °C)^[27-28]。② 营养盐动态: 秋季可能因降水减少或水体分层导致氮磷含量比值变化, 从而进一步提高了蓝藻优势度。③ 光照条件: 夏秋季日照时长和强度可能更适合蓝藻的光合作用, 尤其是具有伪空泡的蓝藻(如假鱼腥藻)可通过调节浮力抢占光照资源。从全年来看, 蓝藻门和硅藻门呈现一定的拮抗作用。尤其是在夏秋季, 蓝藻门在较高温水体中大量繁殖, 会释放出一些抑制硅藻门生长的有机物质。

浮游动物共鉴定出4大类39种。其中, 轮虫一年四季均有优势种出现, 且密度最大。其原因可能在于, 与枝角类和桡足类相比, 轮虫体型更小, 不易被捕食^[29]; 此外, 轮虫属于孤雌生殖类群, 具有繁殖周期短、频率高的特点, 可在短时间内形成高密度并占据优势^[30-31]。从浮游植物的优势类群、生物量和密度等方面来看, 绿藻和蓝藻指示富营养型水体, 硅藻指示贫营养型水体, 隐藻的出现亦可作为水体富营养化的指示标志^[32]。结合罗华辉等^[33]的生物量评价指标和张星星^[34]的浮游植物密度评价标准, 香河湖水体处于中度富营养化水平。

从生物多样性指数来看, Shannon-Wiener多样性指数^[35]用于描述群落结构中的物种丰富性和群落生态环境的稳定性^[15], 其数值越大, 表明水质状况越好, 环境也越稳定^[36]。本研究中, 浮游植物和浮游动物的 H' 均值分别为 3.167 和 4.325。依据水质生物多样性指数评价分级标准^[37], 香河湖水质为轻污染 - 清洁水体。Margalef 丰富度指数^[38]用于反映某一生境中物种的丰富程度^[39]。本研究中, 浮游植物和浮游动物的 d 均值分别为 5.240 和 4.110。Pielou 均匀度指数^[40]衡量某一生境中物种个体数分配均匀程度, 反映群落中不同物种个体数的差异^[15], 指数值越接近, 表明分布均匀度越高。本研究中, 浮游动物和浮游植物的 J 均值分别为 0.807 和 0.606。从 Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数来看, 香河湖水体属于清洁水体^[41]。从水体理化因子指标分析, 参照国标《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[42], 结合香河湖各水环境因子, 判定该水体介于地表水 I、II 类之间, 总体水质接近 II 类水标准。

从 RDA 分析结果来看, 本研究中, WT 和 DO 是影响香河湖浮游植物群落结构的主要因子。其中, 蓝藻类群(如假鱼腥藻、螺旋藻等)与水温呈正

相关^[43], 这可能是由于较高温度不仅有利于蓝藻的代谢和生长, 又可以通过促使水体分层, 使其浮力调控能力的蓝藻占据竞争优势^[16], 从而在夏秋季成为优势类群; 而硅藻(如小环藻)则与 WT 呈较强的负相关, 与 DO 呈正相关, 这是因为硅藻偏好低 WT、高 DO 的环境^[43]。此外, SD 对浮游动物的群落结构具有显著影响, 大部分轮虫类优势种与其呈显著正相关, 这与卢亚芳等^[44]的研究结果一致; 而大型桡足类群落结构则与 SD 呈负相关, 这可能是由于 SD 影响浮游植物光合作用, 从而间接影响桡足类食物来源密度^[45]。上述结果表明, 香河湖浮游生物群落的结构演替主要受 WT, DO 和 SD 的驱动, 同时受到食物资源的间接调控。

综合生物多样性指数、水环境因子及 RDA 分析结果, 香河湖水体处于中富营养化水平, 水质属轻污染 - 清洁状态, 符合应急水源水质要求。

3.2 香河湖水质的改进措施

基于目前香河湖浮游生物资源及鱼产力状况, 在管理措施方面, 应加大滤食性鱼类和草食性鱼类的投放^[46-47]; 在生态修复方面, 可适量投放田螺等底栖动物以翻新底泥、净化水体^[48-49], 并合理配置净化型水生植物, 结合人工干预改善水体混合条件; 在社会管理方面, 应加强周边工厂污水排放的常态化监测, 并加强周边居民的生态环保意识宣传教育, 从而推动水体治理进入良性循环, 保障湖泊渔业资源的可持续发展。同时, 为全面掌握水体生态状况, 应持续开展底栖动物和鱼类资源调查, 并建立香河湖关键水质指标的长期监测机制。

4 结论

香河湖浮游植物以绿藻门为主, 硅藻和蓝藻次之; 浮游动物以轮虫为主, 枝角类和桡足类占比低。整体群落结构稳定性较低, 水体呈中富营养化状态; 多样性指数显示, 香河湖水质为轻污染 - 清洁水体; RDA 分析结果表明, WT, DO 和 SD 是驱动浮游生物群落变化的关键因子。综合浮游生物群落结构特征与水体理化指标, 判定香河湖水质符合地表水 II 类标准。

参考文献:

- [1] RUBIN M A, LEFF L G. Nutrients and other abiotic factors affecting bacterial communities in an Ohio River (USA) [J]. *Microbial Ecology*, 2007, 54 (2): 374-

- 383.
- [2] 杨潇, 马吉顺, 张欢, 等. 鄱阳湖不同水文期浮游生物群落结构特征和影响因素及水质评价[J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1093-1103.
- [3] ZHANG Xiaojing, WANG Guoqiang, TAN Zhongxin, et al. Effects of ecological protection and restoration on phytoplankton diversity in impounded lakes along the eastern route of China's South-to-North Water Diversion Project[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 79(5): 148870.
- [4] PÉREZ J R, LOUREIRO S, MENEZES S, et al. Assessment of water quality in the Alqueva Reservoir (Portugal) using bioassays[J]. *Environmental Science & Pollution Research Internation*, 2010, 17(3): 688-702.
- [5] 许志, 陈小华, 沈根祥, 等. 上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3621-3628.
- [6] 袁菁菁. 贵州平寨水库浮游生物群落结构特征及鱼产力评估[D]. 钦州: 北部湾大学, 2024.
- [7] 王梦, 罗杨, 程如丽, 等. 四川诺水河自然保护区铁溪河段水生生物资源现状及水质评价[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2022, 39(6): 129-138.
- [8] 陶江, 邵旭东, 范帆, 等. 太湖生态涵养区浮游植物多样性[J]. 环境监控与预警, 2024, 16(5): 131-138.
- [9] BARINOVA S, KRUPA E. Bioindication of ecological state and water quality by phytoplankton in the Shardara reservoir, Kazakhstan[J]. *Environmental and Ecology Research*, 2017, 5(2): 73-92.
- [10] 危善玉, 杨婷, 朱典范, 等. 丰水期湘江流域浮游动物群落结构及其水质评价[J]. 水产科学, 2025, 44(5): 782-791.
- [11] 中华人民共和国农业部. 淡水浮游生物调查技术规范: SC/T 9402—2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [12] 史楠楠. 巴里坤盐湖浮游生物多样性研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- [13] 翁建中, 徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [14] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [15] 赵文. 养殖水域生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [16] 赵文. 水生生物学(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [17] 王鑫, 李昌文, 徐加涛, 等. 灌河口海域水生动物群落结构及分布特征[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2023, 32(4): 29-41.
- [18] 杨文焕, 申涵, 周明利, 等. 包头南海湖浮游植物优势种生态位及种间联结性季节分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 383-391.
- [19] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.
- [20] 何志辉, 李永函. 清河水库的浮游生物[J]. 水生生物学集刊, 1983, 8(1): 71-84.
- [21] 李晓华, 詹卫华, 何绪刚, 等. 水库鱼产力评价标准: SL 563—2011[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [22] 何志辉. 湖泊水库鱼产力的估算[J]. 水产科技情报, 1982(4): 2-5.
- [23] 孙兴, 蒋小明, 宋高飞, 等. 青海湖浮游植物群落时空格局及其环境驱动因子[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 540-556.
- [24] 王欣然, 杨子龙, 孙毅, 等. 红山水库浮游生物调查及鱼产力估算[J]. 黑龙江水产, 2024, 43(1): 9-17.
- [25] 王军敏, 毛成责, 魏爱泓. 秦山岛周边海域浮游植物群落的变化[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2021, 30(1): 40-46.
- [26] 邵旭东, 李毅超, 白禄军, 等. 打虎石水库浮游生物群落结构特征及鱼产力评估[J]. 水产科学, 2022, 41(3): 467-474.
- [27] 王茂伟. 环境因子对伪鱼腥藻生长及光合生理的影响[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [28] 李燕均. 三种水华蓝藻竞争机理的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [29] 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 等. 嘉兴南湖不同湖区浮游动物群落结构特征与环境因子关系[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3107-3117.
- [30] HOLST H, ZIMMERMANN H, KAUSCH H, et al. Temporal and spatial dynamics of planktonic rotifers in the Elbe Estuary during spring[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1998, 47: 261-273.
- [31] 刘玉飞, 葛丹, 施银燕, 等. 分水江流域秋季浮游动物群落特征分析[J]. 环境生态学, 2024, 6(9): 55-59.
- [32] 曾亚英, 王晓清, 杜海波, 等. 居延海浮游生物群落特征与水质评价[J]. 北方农业学报, 2022, 50(3): 95-103.
- [33] 罗华辉, 汪小冬, 魏朝宇, 等. 东洞庭湖沿岸带浮游生物群落结构与多样性分析[J]. 山地农业生物学报,

- 2021, 40 (3): 15-20.
- [34] 张星星. 宁德市七都溪(赤溪)浮游生物多样性分析[J]. 海峡科学, 2024 (5): 90-94.
- [35] SHANNON C E, WIENER W. The Mathematical Theory of Communication [M]. Champaign: University of Illinois Press, 1963.
- [36] 何滔, 刘建虎, 张春霖, 等. 长江上游支流抱龙河浮游生物现状及多样性评价[J]. 淡水渔业, 2014, 44 (3): 51-55.
- [37] 中华人民共和国生态环境部. 湖库水生态环境质量监测与评价技术指南(试行): HJ 1296—2023 [S]. 北京: 生态环境部环境标准研究所, 2023.
- [38] MARGALEF D R. Information theory in ecology [J]. General Systems, 1958, 3: 36-71.
- [39] 石教旭, 杨丽, 陈廷琴, 等. 赤水河云南段秋冬季浮游动物多样性分析[J]. 乡村科技, 2022, 13 (20): 124-129.
- [40] PIELOU E C. Species-diversity and pattern diversity in the study of ecological succession [J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10 (2): 370-383.
- [41] 张建忙, 史浩栋, 余森, 等. 基于主成分分析及水质标识指数法的南通海门区浅层地下水水质评价[J]. 地下水, 2024, 46 (5): 16-20.
- [42] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [43] GOGOI P, DAS S K, DAS S S, et al. Environmental factors driving phytoplankton assemblage pattern and diversity: insights from Sundarban eco-region, India [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2020, 21: 354-367.
- [44] 卢亚芳, 黄永春, 周立红. 杏林湾水库环境因子对浮游轮虫密度的影响[J]. 上海水产大学学报, 2002, 11 (3): 225-229.
- [45] 高原, 赖子尼, 曾艳艺, 等. 珠江三角洲河网桡足类群落结构及其与水环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2015, 22 (2): 302-310.
- [46] 石建, 韩亚慧, 周小愿, 等. 商南县莲花台水库水生生物资源调查与鱼产力估算[J]. 安徽农业科学, 2024, 52 (5): 99-102.
- [47] 杨娟, 李勤慎, 邵东宏, 等. 九甸峡水库水质生物学评价及其鱼产力分析[J]. 中国水产, 2023 (2): 76-79.
- [48] 王明宝, 陈斌. 中华圆田螺特征特性及池塘人工养殖技术[J]. 现代农业科技, 2012 (9): 343.
- [49] 杨东辉. 中华圆田螺的生态养殖技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.

(责任编辑: 褚金红)